

РОЛЬ ПУЛЬСАЦИЙ ПУЗЫРЯ В ПРОЦЕССАХ ГЕНЕРАЦИИ ИМПУЛЬСОВ ТЯГИ ДЛЯ ВОДНЫХ ДВИЖИТЕЛЕЙ

В. С. Тесленко, А. П. Дрожжин, Р. Н. Медведев

Институт гидродинамики им. М. А. Лаврентьева
Сибирское отделение Российской академии наук
Новосибирск, Россия
e-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

Представлены результаты экспериментов по измерениям импульсов силы тяги и пульсаций пузыря, генерируемых на плоской тяговой стенке, при сжигании стехиометрической пропан-кислородной смеси. Показано, что для одинаковых газовых зарядов средняя удельная тяга при импульсном сжигании газа на плоской тяговой стенке может быть выше, чем для вариантов сжигания газовых зарядов в цилиндрических стволах. Увеличение циклической частоты сжигания газовых зарядов с одновременным сохранением величины удельной тяги при переходе от цилиндрической трубы к плоской стенке позволяет увеличить среднюю тягу подводного движителя и уменьшить кавитационные и фрикционные потери.

Введение

Рассмотренные в работах [1] схемы прямого преобразования энергии продуктов сгорания в импульсы тяги до настоящего времени не нашли широкого применения. Это связано с недостаточной изученностью термодинамических и гидродинамических процессов при сжигании топлив непосредственно в воде. В настоящей работе рассматриваются возможности применения методов импульсного сжигания газов в воде для генерации тяги в пульсирующих режимах.

Применение методов сжигания газов в воде для генерации тяги ранее рассматривалось в работах [2–6]. Проведенные эксперименты и модельные расчеты для цилиндрических стволов, создающих тягу подобно водомету, показали, что амплитуда первого импульса силы слабо зависит от объема сжигаемого газа. Амплитуды последующих импульсов силы, возникающих в моменты захлопывания пузыря и пузырьковых кластеров, зависят от геометрии камеры сгорания. Периоды между первым и последующими положительными импульсами для цилиндрических стволов зависят от длины

DOI: 10.30826/000000000

© Коллектив авторов, 2019

ствола. С увеличением длины ствола период первой пульсации пузыря увеличивается [3]. Возникающие краевые эффекты в виде кавитационных вихревых колец на срезе цилиндрического ствола и кавитация внутри ствола приводят к диссипативным потерям энергии импульсов, и их необходимо исключать.

С целью разработки эффективных методов импульсного сжигания газов в воде для генерации тяги проведена серия экспериментов с измерениями импульсов силы и киносъемкой пульсаций пузыря на плоской стенке, затопленной в воду.

Постановка экспериментов

Постановка экспериментов аналогична экспериментам с цилиндрическими стволами [3,5]. На рис. 1 приведена принципиальная схема установки для представляемой серии экспериментов.

В кювете из оргстекла $30 \times 30 \times 50$ см (1), заполненной водой, располагалось тяговое устройство в виде диска из оргстекла диаметром $D = 98$ мм и толщиной $h = 10$ мм (2) и пластикового стержня диаметром $d = 30$ мм (3). Для измерения импульсов силы стержень 3 был соединен с пьезодинамометром 4. Динамометр крепился на горизонтальной жесткой балке 5. Для защиты измерительного комплекса от воды к диску крепился прозрачный пластиковый цилиндр 6. Газовые заряды 7 располагались в воде в нижней части диска 2 и поджигались от высоковольтного блока 8 искрой с энергией до 2 Дж. Электрический сигнал от динамометра записывался на цифровой осциллограф TDS-210 9. Эксперименты проводились с газовыми зарядами стехиометрической пропан-кислородной смеси ($C_3H_8 + 5O_2$) с объемами

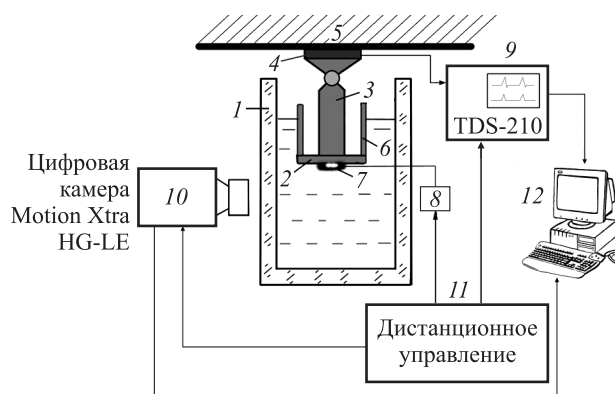


Рис. 1 Постановка экспериментов

$V_g = 1\text{--}4$ мл. Киносъемка гидродинамических процессов осуществлялась при помощи цифровой камеры MotionXtra HG-LE 10. Управление системой осуществлялось с пульта 11 с регистрацией результатов на компьютере 12.

Результаты экспериментов

На рис. 2 представлены кадры кинограммы гидродинамических процессов, происходящих при сжигании пропан-кислородной смеси объемом $V_g = 2$ мл на открытой тяговой стенке в виде диска диаметром $D = 98$ мм. На рис. 3, а представлена осциллограмма импульсов силы на эту тяговую стенку.

Для качественного и количественного сравнения импульсов от разных макетов на рис. 3, б приведена осциллограмма импульсов силы для макета

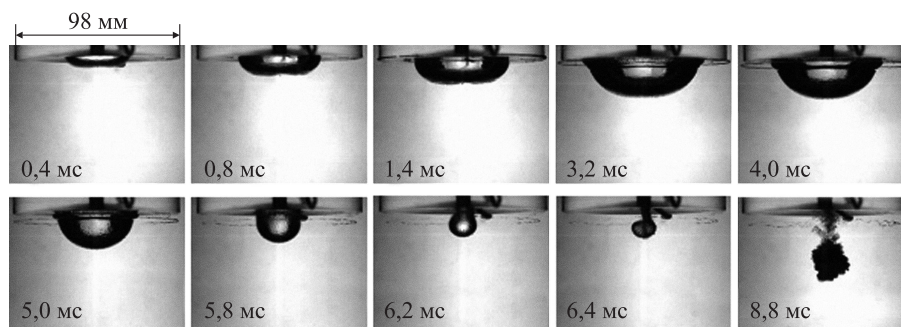


Рис. 2 Кинограмма пульсаций пузыря на тяговой стенке в виде диска для заряда газовой смеси $V_g = 2$ мл

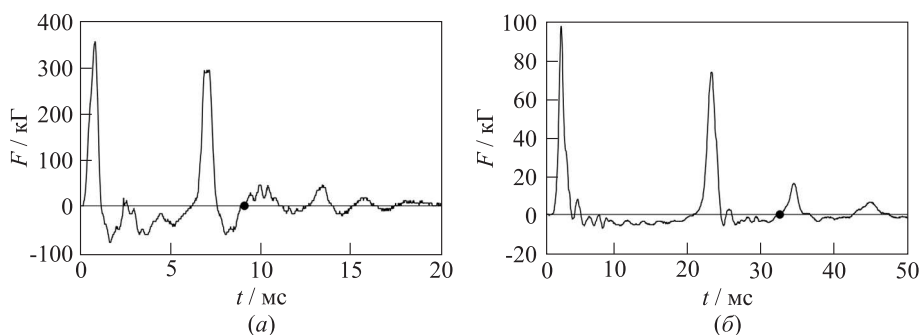


Рис. 3 Осциллограмма импульсов силы для варианта сжигания газовой смеси ($V_g = 3$ мл) на стенке в виде диска диаметром $D = 98$ мм (а) и в цилиндрическом стволе ($d = 29$ мм, $H = 93$ мм) (б)

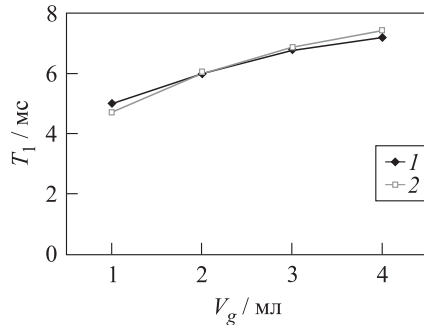


Рис. 4 Зависимости периода первой пульсации пузыря от объема газового заряда: 1 — эксперимент; 2 — Релей

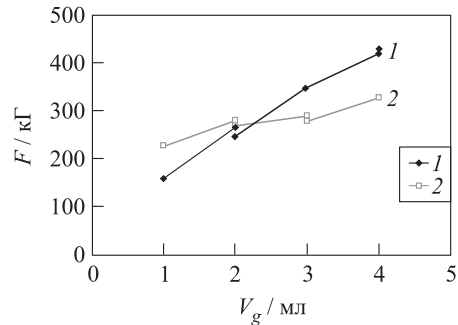


Рис. 5 Зависимость амплитудных значений силы на стенку от объема газового заряда для первого (1) и второго (2) импульсов силы

в виде цилиндрического ствола с диаметром $d = 29$ мм и длиной $H = 93$ мм [3, 5].

На рис. 4 представлены экспериментальные и теоретические результаты зависимости периодов первой пульсации пузыря от величины газового заряда. Расчеты были выполнены по формуле Релея–Виллиса:

$$T = 1,14\sqrt{\rho}\frac{E_0^{1/3}}{P_a^{5/6}}. \quad (1)$$

Здесь T — период пульсации пузыря; ρ — плотность жидкости; P_a — давление в жидкости; $E_0 = P_0V_g/(\gamma - 1)$ — энергия газового заряда, где V_g — объем газового заряда, P_0 — начальное давление в пузыре.

Предполагалось, что $\gamma = 1,2$ при этом $E_0 = 5P_0V_g$.

Представленная на рис. 4 расчетная зависимость соответствует формуле для значений $P_0 = 15$ атм. Измерения P_0 выполнялись ранее в экспериментах с цилиндрическими макетами [3].

На рис. 5 представлены результаты экспериментальных измерений амплитудных значений генерируемой силы на тяговое устройство от объема газового заряда V_g для первого (1) и второго (2) импульсов.

Из результатов, представленных на рис. 5, следует, что для заряда 1 мл амплитуда второго импульса выше, чем у первого. Возможно, это связано с неполным сгоранием газа за первый период пульсации пузыря и последующим догоранием газа при захлопывании пузыря, что возможно за счет адиабатического нагрева газа.

Для всех экспериментов по данным осциллограмм рассчитывалась удельная тяга за один цикл сжигания газа по формуле:

Результаты измерений удельной тяги J_1 , J_4 и J_s для 4-х макетов движителей для газовых зарядов $V_g = 3$ мл

Макет	H , мм	T_1 , мс	J_1 , с	J_4 , с	J_s , с
Цилиндр* ($d = 29$ мм)	129	27	$1,8 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^3$	$1,5 \cdot 10^3$
Цилиндр* ($d = 29$ мм)	91	20	$1,3 \cdot 10^4$	$1,0 \cdot 10^4$	$1,5 \cdot 10^4$
Цилиндр* ($d = 29$ мм)	47	14	$1,7 \cdot 10^4$	$1,6 \cdot 10^4$	$1,7 \cdot 10^4$
Плоский диск ($D = 98$ мм)		7	$3,7 \cdot 10^4$	$3,3 \cdot 10^4$	$5,5 \cdot 10^4$

*Данные по результатам авторских работ [3, 5].

Замечания: H — длина ствола; T_1 — период первой пульсации пузыря; J_1 — удельная тяга, рассчитанная для первого положительного импульса; J_4 — удельная тяга для положительных и отрицательных импульсов до момента генерации третьего положительного импульса (на рис. 3 отмечено точкой); J_s — удельная тяга, рассчитанная для всей осциллограммы.

$$J_n = \frac{1}{m} \int_0^t F(t) dt,$$

где $F(t)$ — сила, действующая на тяговую стенку; m — масса заряда горючей смеси газа; t — интервал времени интегрирования импульсов силы; n — условный индекс измерений удельной тяги.

В таблице представлены результаты измерений удельной тяги J_1 , J_4 и J_s для 4-х макетов движителей для газовых зарядов $V_g = 3$ мл.

Анализ результатов

Полученные экспериментальные и расчетные результаты позволяют сравнивать два принципиально различных подхода к решению задач по созданию водных движителей без двигателей внутреннего сгорания (ДВС) и без винтов:

- (1) циклическое сжигание газа в воде, в цилиндрических стволах, что аналогично водометным движителям;
- (2) циклическое сжигание газа в воде непосредственно на тяговой стенке в отсутствие боковых поверхностей.

Учитывая, что количественное сравнение тяговых характеристик проводилось для одинаковых газовых зарядов, можно рассчитать параметр усредненной удельной тяги для циклического сжигания газа.

Усредненную удельную тягу можно рассчитывать с помощью формулы:

$$\langle I_N \rangle = \frac{1}{mT_N} \int_0^{T_N} F(t) dt = \nu \frac{1}{m} \int_0^{T_N} P(t) S dt,$$

где $F(t)$ — сила, действующая на тяговую стенку в направлении оси движения; T_N — длительность всех положительных и отрицательных фаз за один цикл сжигания газового заряда; ν — задаваемая или предельная частота циклов сжигания зарядов; P — давление в пузыре; S — площадь контакта газового заряда с тяговой стенкой.

Предельная частота циклов сжигания газовых зарядов зависит от функциональных возможностей того или иного устройства, с учетом всех гидродинамических процессов:

- (1) для проточных цилиндрических стволов необходимо наличие набегающего потока воды для заполнения ствола последующей порцией жидкости. Время заполнения каждой последующей порцией воды будет определяться как $t_v \sim H/v$, где H — длина цилиндра; v — скорость втекания жидкости в ствол. При этом необходимо учитывать время срабатывания клапанов, обеспечивающих необходимую упорную поверхность. В наших экспериментах упорной поверхностью является торец ствола цилиндра, что обеспечивает максимальные значения силы на стенку $F = PS$, где P — давление в пузыре; S — площадь упора, площадь контакта пузыря с тяговой стенкой. Однако введение клапанов дополнительно уменьшает цикличность и увеличивает потери энергии. Если пренебречь временами срабатывания клапанов и временем инъекции газа в воду и предположить, что максимально предельная скорость втекания воды в ствол не может превышать скорость границы пузыря при его пульсациях, то можно полагать, что минимальный цикл перезарядки определится как $t_v \sim T_1$. Следовательно, максимальную частоту циклов можно оценивать как $\nu = 1/T_1$. Теоретическая формула для периода первой пульсации пузыря в цилиндрическом стволе получена в работе [3], в которой показано, что период пульсации пузыря зависит от длины ствола;
- (2) аналогично и для плоской тяговой стенки без боковых границ. При этом из экспериментов следует, что смена порций жидкости обеспечивается самим пузырем при его аксиальном захлопывании и последующим метанием сгоревшего газа от тяговой стенки (см. рис. 2). Эта особенность избавляет систему от сложных устройств в виде клапанов или турбин и др. Для плоской тяговой стенки минимальное время между циклами подачи последующей порции газового заряда в воду будет определяться периодом пульсаций пузыря (1) и временем инъекции газа в воду.

Преимущество метода генерации тяги на плоской стенке в сравнении с «классическим» цилиндрическим вариантом наглядно видно из представленных результатов (см. рис. 3 и таблицу) для одинаковых газовых зарядов. Например, для тяговой стенки диаметром $D = 98$ мм цикличность сжигания газа можно обеспечить с частотой до 100 Гц.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что сжигание газа на открытой тяговой стенке более эффективно, чем в цилиндрических стволах, как по параметрам удельной тяги, так и по параметрам рассчитываемой усредненной тяги, за счет возможности увеличения частоты циклов. Параметр усредненной удельной тяги показывает максимально возможную частоту сжигания топлива без потери удельной тяги. Видно, что для случая плоского диска этот параметр выше за счет существенного уменьшения периодов пульсаций пузыря. Это аналогично увеличению средней мощности ДВС за счет увеличения числа оборотов коленчатого вала.

Выводы

Результаты экспериментов показали, что удельная тяга для случая сжигания газа на плоской тяговой стенке без боковых границ превосходит удельную тягу для цилиндрических стволов.

Полученные результаты указывают на возможность сжигания газов в воде на плоской стенке с частотой большей, чем частота сжигания в цилиндрических камерах при прочих равных условиях. Максимально возможная частота циклов сжигания газовых зарядов в случае плоской стенки определяется как $\nu_{\max} = 1/T$, где T — период пульсации пузыря у стенки.

Увеличение циклической частоты сжигания газовых зарядов с одновременным сохранением величины удельной тяги при переходе от цилиндрической трубы к плоской стенке позволяет увеличить среднюю тягу подводного движителя и уменьшить кавитационные и фрикционные потери.

Литература

1. Башкатов В. А., Орлов П. П., Федосов М. И. Гидрореактивные пропульсивные установки. — Л.: Судостроение, 1977. 296 с.
2. Teslenko V. S., Drozhzhin A. P., Medvedev R. N., Batraev I. S. In-water gas combustion in linear and annular gas bubbles // Thermophys. Aeromech., 2014. Vol. 21. No. 4. P. 479–488. <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/TiA-eng.pdf>.
3. Medvedev R. N., Drozhzhin A. P., Teslenko V. S. Thrust generation by pulse combustion of gas in a submerged chamber // Int. J. Multiphas. Flow, 2016. Vol. 83. P. 232–238. <http://swsl.hydro.nsc.ru/publ/Medvedev-IJMF2016.pdf>.
4. Фролов С. М., Аксенов В. С., Садыков И. А., Авдеев К. А., Шамшин И. О. Водометный движитель с импульсно-детонационным горением жидкого топлива // Докл. Акад. наук, 2017. Т. 475. № 3. С. 281–285. <http://www.frolovs.ru/pdf/2017-20-rus.pdf>.
5. Teslenko V. S., Drozhzhin A. P., Medvedev R. N. In-water gas combustion for thrust production // Thermophys. Aeromech., 2017. Vol. 24. No. 4. P. 583–591. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1134%2FS0869864317040102.pdf>.
6. Keithly D., Whitehead J., Voinea A., Horna D., Hollenberg S., Pec M., Pikul J., Shepherd R. F. A cephalopod-inspired combustion powered hydro-jet engine using soft actuators // Extreme Mechanics Lett. 20, 2018. Vol. 20. P. 1–8.

THE ROLE OF BUBBLE PULSATIONS
IN PROCESSES OF GENERATION OF THRUST PULSES
FOR WATER MOVERS

V. S. Teslenko, A. P. Drozhzhin, and R. N. Medvedev

M. A. Lavrentyev Institute of Hydrodynamics
Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences
Novosibirsk, Russia
e-mail: teslenko@hydro.nsc.ru

The results of experiments on measurements of pulses of thrust force and bubble pulsations generated on a flat traction wall due to the combustion of a stoichiometric propane–oxygen mixture are presented. It is shown that for the same gas charges, the average specific thrust for pulsed combustion of gas on a flat traction wall can be higher than that for the combustion of gas charges in cylindrical trunks. By increasing the cyclic frequency of combustion of gas charges and maintaining simultaneously the specific thrust value during the transition from a cylindrical tube to a flat wall, it is possible to increase the average thrust of underwater propulsor and to reduce cavitation and friction losses.